

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 23 期 Vol.31 No.23 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 23 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

不同海拔高度高寒草甸光能利用效率的遥感模拟·····	付 刚,周宇庭,沈振西,等 (6989)
天山雪岭云杉大气花粉含量对气温变化的响应·····	潘燕芳,阎 顺,穆桂金,等 (6999)
春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力·····	刘华雪,柯志新,宋星宇,等 (7007)
降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响 ·····	吴新卫,李国勇,孙书存 (7013)
基于 SOFM 网络对黄土高原森林生态系统的养分循环分类研究·····	陈 凯,刘增文,李 俊,等 (7022)
不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征 ·····	王 琰,陈建文,狄晓艳 (7031)
盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响 ·····	刘慧霞,郭兴华,郭正刚 (7039)
高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响·····	黄激激,张念念,胡庭兴,等 (7047)
黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 ·····	张建军,李慧敏,徐佳佳 (7056)
青杨雌雄群体沿海拔梯度的分布特征·····	王志峰,胥 晓,李霄峰,等 (7067)
大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征·····	杜飞雁,林 钦,贾晓平,等 (7075)
湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素·····	张才学,龚玉艳,王学锋,等 (7086)
台湾海峡鲈鱼种群遗传结构·····	张丽艳,苏永全,王航俊,等 (7097)
洱海入湖河流苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素·····	于 超,储金宇,白晓华,等 (7104)
转基因鱼试验湖泊铜锈环棱螺种群动态及次级生产力·····	熊 晶,谢志才,蒋小明,等 (7112)
河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征 ·····	王维奇,徐玲琳,曾从盛,等 (7119)
EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响 ·····	王红新,胡 锋,许信旺,等 (7125)
不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响·····	卢艳艳,宋付朋 (7133)
垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响·····	马 丽,李潮海,付 景,等 (7141)
DCE 不同施用时间对小麦生长期 N ₂ O 排放的影响 ·····	纪 洋,余 佳,马 静,等 (7151)
氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用 ·····	刘建芳,周瑞莲,赵 梅,等 (7161)
东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价 ·····	罗 燕,乔玉辉,吴文良 (7170)
土壤施硒对烤烟生理指标的影响·····	许自成,邵惠芳,孙曙光,等 (7179)
不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响·····	宋 伟,赵长星,王月福,等 (7188)
西花蓟马的快速冷驯化及其生态学代价·····	李鸿波,史 亮,王建军,等 (7196)
温度对麦长管蚜体色变化的影响·····	邓明明,高欢欢,李 丹,等 (7203)
不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响 ·····	高建昌,郭广君,国艳梅,等 (7211)
基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究·····	陈 贺,杨 盈,于世伟,等 (7218)
两种典型养鸡模式的能值分析 ·····	胡秋红,张力小,王长波 (7227)
四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计 ·····	何宗祥,张庭廷 (7235)
流沙湾海草床重金属富集特征·····	许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等 (7244)
基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析 ·····	张培峰,胡远满,熊在平,等 (7251)
景观空间异质性及城市化关联——以江苏省沿江地区为例·····	车前进,曹有挥,于 露,等 (7261)
基于 CVM 的太湖湿地生态功能恢复居民支付能力与支付意愿相关研究·····	于文金,谢 剑,邹欣庆 (7271)
专论与综述	
北冰洋海域微食物环研究进展·····	何剑锋,崔世开,张 芳,等 (7279)
城市绿地的生态环境效应研究进展·····	苏泳娴,黄光庆,陈修治,等 (7287)
城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应 ·····	方凤满,林跃胜,王海东,等 (7301)
研究简报	
三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征 ·····	林英华,汪来发,田晓堃,等 (7311)
广州小斑螟发生与环境因子的关系·····	刘文爱,范航清 (7320)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 39 * 2011-12



封面图说:黄河的宁夏段属于中国的半荒漠地区,这里气候干燥、降水极少(250mm 以下)、植被缺乏、物理风化强烈、风力作用强劲、其蒸发量超过降水量数十倍。人们从黄河中提水引水灌溉土地,就近形成了荒漠中的绿洲。有水就有生命,有水就有绿色。这种独特的条件形成了人与沙较量的生态关系——不是人逼沙退就是沙逼人退。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

许战州, 朱艾嘉, 蔡伟叙, 张敬怀, 叶建萍. 流沙湾海草床重金属富集特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7244-7250.

Xu Z Z, Zhu A J, Cai W X, Zhang J H, Ye J P. Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7244-7250.

流沙湾海草床重金属富集特征

许战州^{1,*}, 朱艾嘉^{1,2}, 蔡伟叙¹, 张敬怀¹, 叶建萍¹

(1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广州 510300; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:海草床是一种重要的海洋湿地生态系统, 首次研究了流沙湾海草床重金属(铜、铅、镉、锌)的富集特征, 并评价其潜在生态危害。研究表明: 水体和沉积物环境中的重金属含量很低, 潜在生态危害轻微, 但是海草床大型底栖生物(绿藻、海草、双壳类和腹足类)对这 4 种重金属具有富集作用, 其中对镉的富集最显著。绿藻对铜、铅和锌的富集效应明显大于海草, 腹足类对铜、铅和锌的富集效应明显大于双壳类; 而对镉的富集效应, 情况正好相反。双壳类生物体内铅和镉含量普遍超一类标准, 超标程度较高。

关键词:海草床; 重金属; 富集; 潜在危害

Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay

XU Zhanzhou^{1,*}, ZHU Aijia^{1,2}, CAI Weixu¹, ZHANG Jinghui¹, YE Jianping¹

1 South China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Guangzhou 510300, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Seagrass beds are valuable coastal ecosystems and are also of economic importance. For the first time, we measured the levels of heavy metals (copper, lead, cadmium, and zinc) in the environment and in the bodies of benthic biota within a seagrass bed in Liusha Bay, Guangdong Province. The results revealed that concentrations of heavy metals in the water column and sediment were relatively low and of little potential threat to the ecosystem. The average concentrations of copper, lead, and zinc in the water column were $(2.2 \pm 0.1) \mu\text{g/L}$, $(0.8 \pm 0.2) \mu\text{g/L}$, and $(7.0 \pm 0.3) \mu\text{g/L}$, respectively. Cadmium was not detected in the water column. The average concentrations of copper, lead, cadmium, and zinc in the surface of the sediment were $(8.2 \pm 0.3) \mu\text{g/L}$, $(17.3 \pm 1.2) \mu\text{g/L}$, $(0.10 \pm 0.2) \mu\text{g/L}$, and $(11.9 \pm 0.2) \mu\text{g/L}$, respectively. The ratios of metal concentration in water compared with sediment were 3 791, 21 625, 2 900, and 1681 for copper, lead, cadmium, and zinc, respectively. In contrast the levels of metals, especially cadmium, were markedly high in the bodies of macro-benthos such as the green algae, seagrasses, mollusca, and gastropods. The average concentrations of copper, lead, cadmium, and zinc in the green algae were 320, 21.0, 0.59 $\mu\text{g/L}$, and 142 $\mu\text{g/L}$, respectively. The average concentrations of copper, lead, cadmium, and zinc in the seagrasses were 13.2, 10.6, 1.00 $\mu\text{g/L}$, and 72.2 $\mu\text{g/L}$, respectively. The average concentrations of copper, lead, cadmium, and zinc in the bodies of mollusca were 1.9, 0.6, 1.0 $\mu\text{g/L}$, and 13.3 $\mu\text{g/L}$, respectively. The average concentrations of copper, lead, cadmium, and zinc in the bodies of gastropods were 5.3, 1.5, 0.15 $\mu\text{g/L}$, and 21.4 $\mu\text{g/L}$, respectively. The biological concentrating factors of benthic flora were generally greater than those of benthic fauna. The average biological concentrating factors for copper, lead, cadmium, and zinc in the green algae were 145.45, 26.25, 11.80, and 20.29, respectively. The average biological concentrating factors for copper, lead, cadmium, and zinc in the seagrasses were 6.00, 13.25,

基金项目: 国家海洋局青年海洋科学基金资助(2008131)

收稿日期: 2010-08-24; 修订日期: 2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzz101@sina.com

20.00, and 10.31, respectively. The average biological concentrating factors for copper, lead, cadmium, and zinc in the bodies of mollusca were 0.86, 0.75, 20.00, and 1.90, respectively. The average biological concentrating factors for copper, lead, cadmium, and zinc in the bodies of gastropods were 2.41, 1.88, 3.00, and 3.06, respectively. The maximum biological concentrating factor was found for copper, in the alga *Cladophora glomerata*. Higher levels of copper, lead, and zinc were found in the green algae than in the seagrass. Lower levels of copper, lead, and zinc were concentrated in the bodies of mollusca than in the gastropods. For cadmium, the patterns of enrichment were reversed. This indicated that the dynamics of enrichment for cadmium might be very different from those of copper, lead, and zinc. Meanwhile, of these four metals, the biological concentrating factor of cadmium was the highest in seagrasses and mollusca. It was also the second highest in gastropods. In contrast, the biological concentrating factor of cadmium was the lowest of the four metals in the green algae. This indicated that the dynamics of enrichment for cadmium in the green algae might be very different from those in seagrasses, mollusca, and gastropods. The concentrations of lead and cadmium in the bodies of mollusca greatly exceeded the first levels of Marine Biological Quality (GB18421—2001, lead: 0.1mg/kg; cadmium: 0.2mg/kg). The greatest quality index (16.2) was found for cadmium in the bodies of *Barbatia fusca*, indicating that there was cadmium discharging near the seagrass meadow.

Key Words: seagrass bed; heavy metal; enrichment; potential threat

海草床是一种典型的海洋湿地生态系统,底栖生物的种类和生物量一般都高于底质裸露的相邻区域^[1]。因此,海草床成为沿海居民采集和捕捞海产品的重要场所。海草床大多分布在沿岸,受到海洋和陆地人类活动的双重影响,环境压力较大。近十几年来,我国近岸海洋环境污染趋势加重,对海草床已经构成威胁^[2]。但是,国内很少有研究污染物在海草床的行为效应。

初级生产者重金属进入食物链的起点,大型底栖海藻和海草是海草床中重要的初级生产者。由于结构的显著差异,大型底栖海藻和海草对重金属的富集效应很可能不同,但是很少有研究涉及。海草床内部的食物关系复杂,既有草食动物,又有食碎屑者和肉食动物,因此,重金属在食物网中的行为比较复杂。在流沙湾海草床环境保护和重金属污染防治中,应重点关注哪种元素也是一个具有重要学术价值和现实意义的命题。本论文首次研究国内典型的亚热带海草床内重金属的富集特征,并对其潜在生态危害进行评价,可以为海草床生态系统的健康评价和水产品安全评估提供研究案例。

1 研究地点和方法

1.1 研究区概况

流沙湾海草床(中心位置为 20°26.1'N, 109°57.1'E)位于广东省徐闻县近岸,面积约 900hm²,海草种类有喜盐草(*Halophila ovalis*)和二药藻(*Halodule uninervis*),前者是优势种^[2]。海草床是当地渔民从事经济活动的重要场所,并以出售水产品为重要的收入来源。

1.2 样品采集和测定

底栖生物样品主要是通过现场采集和从渔民手中购买获得。采样时间为 2008 年 10 月 18 日至 20 日,在海草床的中心区、边缘分别设置 3 个断面,在断面上每隔 20 m 采一个样(图 1)。在海草床内发现喜盐草和二药藻,都是比较柔软的小个体海草,用手将海草连根挖出,用海水洗去泥沙,分别装入保鲜袋。其他底栖生物的采集方法为用塑料铲取 25 cm × 25 cm 样方内的表层沉积物(0—30 cm),全部倒入孔径为 1 mm 的筛中,用现场海水冲洗干净,将所有生物拣出,分类装袋保存。同时采集现场水质和表层沉积物样品。贝类样品采回来后立即置于沙滤海水中,让它们吐沙,再冰冻保存。所有样品冰冻保存,运回实验室。在实验室,将生物样品分类鉴定后按种类分开装袋,取生物量足够的样品进行前处理。

水质样品、沉积物样品和生物样品的制备和测定按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)中对应项目进行,用无火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Pb、Cd 含量,按照火焰原子吸收分光光度法测定 Zn 含量;同时制

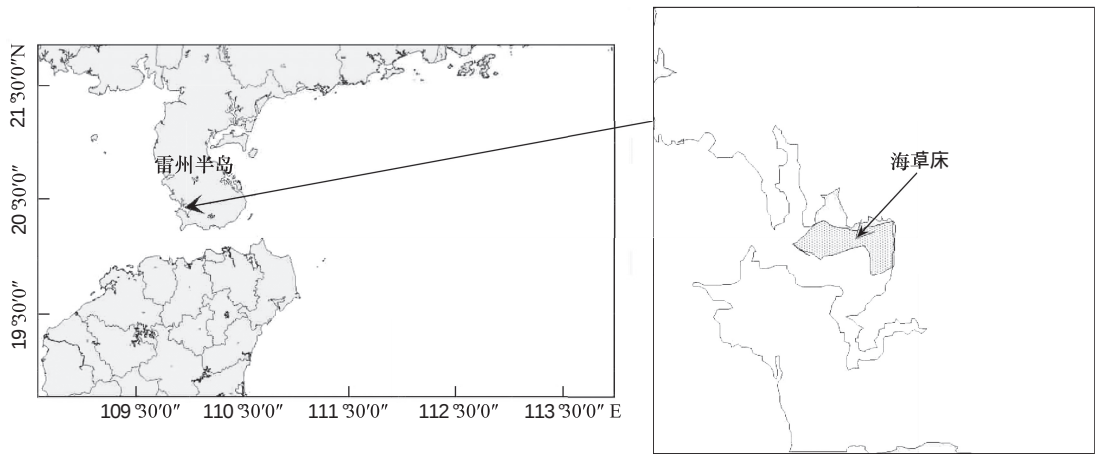


图 1 采样位置示意图

Fig.1 Location of the sampling transects

备分析空白试液。所用仪器是 SOLAAR M6 型原子分光光度计。

质量控制,使用标准物质(贻贝标准,国家海洋局第二海洋研究所)在与样品分析流程相同条件下作了对照分析,测值的准确度符合《海洋监测质量控制》的要求,证明本实验对样品的分析方法是可靠的。

1.3 沉积物重金属潜在生态危害评价

本文选用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法进行评价^[3-5]。根据这一方法,某一区域沉积物中第 i 种重金属的潜在生态危害系数 E_r 及沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 RI 可分别表示为:

$$E_r = T_r \cdot C_f$$

式中, C_f 为重金属的富集系数 ($C_f = C_s / C_n$), C_s 为表层重金属的实测值; C_n 为计算所需的参照值,参照值采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值(表 1); T_r 为重金属的毒性系数,它主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度。

沉积物重金属生态危害程度的划分标准: $E_r < 40$ 或 $RI < 150$ 为生态轻微危害; $40 \leq E_r < 80$ 或 $150 \leq RI < 300$ 为生态危害中等; $80 \leq E_r < 160$ 或 $300 \leq RI < 600$ 为生态危害强; $160 \leq E_r < 320$ 或 $RI \geq 600$ 为生态危害很强; $E_r \geq 320$ 为生态危害极强。

1.4 底栖生物重金属富集系数和质量评价

重金属的生物富集系数 (BCF) 可以表征生物体从周围环境中吸收并积累某种元素或难分解化合物的程度,可以用生物体重金属含量与环境中的该元素的含量之比值求得。绿藻富集重金属的途径主要是藻体表面直接从水体中吸收,海草的叶片和根部都可以吸收并富集重金属^[6-7],但是喜盐草和二药藻的根系都不发达,以叶片吸收途径为主,为了使结果有可比性,用水中重金属含量计算绿藻和海草的富集因子。本研究所选的双壳类全部是滤食性的,因此,沉积物表面和上覆水中的重金属是双壳类体内重金属的主要来源,用沉积物中重金属含量计算双壳类的富集因子。腹足类的爪哇窦螺和珠带拟蟹手螺主要以碎屑为食,秀丽纹织螺是肉食性的,体内重金属来源更复杂。为简化计算,用沉积物中重金属含量计算腹足类的富集因子。

底栖生物质量评价采用单因子评价方法,其关系式为:

$$P = C / C_s$$

式中, P 为质量分数, C 为重金属的实测值, C_s 为重金属的评价标准。本研究中,双壳类生物体内重金属评价

表 1 沉积物重金属的参照值 (C_n) 和毒性系数 (T_r)

Table 1 Reference value (C_n) and toxicity coefficient (T_r) of heavy metal in sediment

金属元素 Heavy metals	Cu	Zn	Pb	Cd
$C_n (10^{-6})$	30	80	25	0.50
T_r	5	1	5	30

标准采用《海洋生物质量》(GB 18421—2001)规定的第一类标准值;腹足类生物体内重金属评价标准采用《全国海岸和海涂资源综合调查简明规程》中规定的生物质量标准(见表2)。

2 结果与讨论

2.1 环境和底栖生物体内重金属含量

采样区域水体的平均盐度为 29.42,海水和表层沉积物重金属含量见表3。在水体中,重金属浓度的高低顺序是 $Zn > Cu > Pb > Cd$,镉未检出;而在表层沉积物中,重金属浓度的高低顺序是 $Pb > Zn > Cu > Cd$ 。沉积物和水体的重金属含量比值大小顺序是 $Pb > Cu > Cd > Zn$ 。

底栖生物体内重金属含量见表4。本实验共选取了海草2种、绿藻2种、双壳类11种、腹足类3种。绿藻重金属含量的大小顺序是 $Cu > Zn > Pb > Cd$;海草重金属含量的大小顺序是 $Zn > Cu > Pb > Cd$;双壳类体内重金属含量的大小顺序是 $Zn > Cu > Cd > Pb$;腹足类体内重金属含量的大小顺序是 $Zn > Cu > Pb > Cd$ 。生物体内的

表2 生物质量评价标准/($\mu g/g$)

Table 2 Standards for biological quality assessment				
生物类别 Biological sorts	Cu	Pb	Cd	Zn
双壳类 Mollusca	≤ 10	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 20
腹足类 Gastropods	≤ 100	≤ 10.0	≤ 5.5	≤ 250

表3 海草床环境水样和表层沉积物中重金属含量($n=3$)

Table 3 Levels of heavy metals in the water column and sediment at the seagrass bed ($n=3$)

样品 Samples	Cu	Pb	Cd	Zn
海水 Sea water /($\mu g/L$)	2.2 ± 0.1	0.8 ± 0.2	nd	7.0 ± 0.3
沉积物 Sediments /($\mu g/g$ 干重)	8.2 ± 0.3	17.3 ± 1.2	0.10 ± 0.2	11.9 ± 0.2
沉积物/水体 Sediments/water	3791	21625	2900 *	1681

* 取海水样中镉检出限的 1/4 计算比值

表4 海草床底栖生物体内重金属含量($\mu g/g$ 干重, $n=3$)

Table 4 Levels of heavy metals in the bodies of benthic biota within the seagrass bed

类群 Group	名称 Name	Cu	Pb	Cd	Zn
绿藻 Green algae	浒苔 <i>Enteromorpha prolifera</i>	60.5 ± 8.2	25.5 ± 6.4	0.68 ± 0.2	192 ± 11.7
	束生刚毛藻 <i>Cladophora fascicularis</i>	579 ± 15.3	16.4 ± 3.5	0.49 ± 0.2	91.9 ± 7.9
	平均值 Mean	320	21.0	0.59	142
海草 Seagrasses	喜盐草 <i>Halophila ovalis</i>	15.0 ± 1.2	16.9 ± 3.4	1.41 ± 0.6	81.9 ± 8.5
	二药藻 <i>Halodule uninervis</i>	11.5 ± 2.4	4.2 ± 1.6	0.58 ± 0.2	62.6 ± 7.5
	平均值 Mean	13.2	10.6	1.00	72.2
双壳类 Mollusca	日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	4.4 ± 0.3	0.8 ± 0.2	1.23 ± 0.7	9.2 ± 3.3
	真曲巴非蛤 <i>Paphia euglypta</i>	2.4 ± 0.2	1.0 ± 0.3	0.37 ± 0.2	10.9 ± 3.2
	栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.19 ± 0.4	16.1 ± 3.4
	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	1.4 ± 0.4	0.5 ± 0.1	0.43 ± 0.2	13.7 ± 4.1
	棕蚶 <i>Barbatia amygdalumtostu</i>	1.0 ± 0.3	0.9 ± 0.2	3.24 ± 0.4	17.6 ± 2.3
	斑纹巴非蛤 <i>Paphia lirata</i>	1.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1	2.81 ± 0.3	9.6 ± 2.1
	粒帽蚶 <i>Cucullaea labios granulosa</i>	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.4	1.04 ± 0.3	15.1 ± 3.7
	大竹蛏 <i>Solen grandis</i>	3.0 ± 1.2	0.4 ± 0.1	0.16 ± 0.02	15.2 ± 1.5
	总角截蛏 <i>Solecurtus divaricata</i>	0.9 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.19 ± 0.02	18.5 ± 3.2
	仙女蛤 <i>Callista</i> sp.	3.2 ± 0.2	0.9 ± 0.2	0.13 ± 0.02	12.9 ± 3.8
	岐脊加夫蛤 <i>Gafrarium divaricatum</i>	1.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.17 ± 0.02	7.6 ± 2.4
	平均值 Mean	1.9	0.6	1.0	13.3
腹足类 Gastropods	爪哇窦螺 <i>Sinum javanicum</i>	5.4 ± 1.2	1.3 ± 0.3	0.05 ± 0.01	18.1 ± 1.3
	珠带拟蟹手螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	3.6 ± 0.5	1.0 ± 0.4	0.16 ± 0.01	20.9 ± 2.5
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>	6.9 ± 0.8	2.1 ± 0.7	0.25 ± 0.01	25.1 ± 4.3
	平均值 Mean	5.3	1.5	0.15	21.4

铜和锌含量普遍都高于铅和镉,这与其他研究结果一致^[6],这主要是因为铜和锌是生物生理活动的必需元素、铅和镉是非必需元素。

2.2 沉积物重金属潜在生态危害

按工业化以前沉积物中重金属最高背景值为参照值的计算结果列于表 5。可见,海草床沉积物中重金属的富集系数的大小排序是 Pb> Cu> Cd> Zn;潜在生态危害系数的大小排序是 Cd>Pb>Cu> Zn。所测 4 种重金属的 E_r 都小于 40,表明它们的潜在生态危害轻微。沉积物中镉的含量最低,富集系数也是次低,但是由于它的毒性系数明显高于其他元素,导致镉的潜在生态危害系数最大。这 4 种重金属的潜在生态危害指数 RI 为 10.97。

2.3 海草床底栖生物对重金属的富集

各类生物的富集系数见表 6。大型底栖绿藻的富集系数大小顺序是 Cu>Pb>Zn>Cd,海草的富集系数大小顺序是 Cd>Pb>Zn>Cu,绿藻的富集系数大小顺序和海草的大致相反。除了镉,绿藻对其他 3 种重金属的富集系数均明显高于海草,其中以铜的富集系数相差最大(24 倍)。藻类和海草的重金属吸收机理存在差异,造成它们重金属富集系数不同。藻类对重金属的吸收包括胞外的快速吸附(快相)和胞内的缓慢富集(慢相)2 个阶段,在快相,重金属被吸附到藻细胞表面,该过程迅速而且可逆,而慢相是重金属跨膜进入胞内富集的过程。在多数情况下,约 80%—90% 的重金属被吸附到藻细胞表面,藻类细胞壁含有一些功能基团如羟基、羧基、氨基、巯基和磷酸根等,因而细胞壁带负电荷,通过离子交换或其他机制可以和水中的重金属离子结合^[8]。海草属于高等植物,大部分的重金属都是通过金属转运蛋白进入叶片细胞或根细胞,并在植物体内进一步转运

表 5 海草床沉积物中重金属的富集系数(C_f)和潜在生态危害系数(E_r)

Table 5 Accumulating coefficients (C_f) and potential ecological risk factors (E_r) of heavy metals in surface sediments from the seagrass bed

指数 Index	Cu	Pb	Cd	Zn
C_f	0.27	0.69	0.20	0.15
E_r	1.36	3.46	6.00	0.15

表 6 海草床底栖生物的重金属富集系数(BCF)

Table 6 Biological concentrating factors (BCF) of heavy metals in the bodies of benthic biota from the seagrass bed

类群 Group	名称 Name	Cu	Pb	Cd	Zn
绿藻 Green algae	浒苔 <i>Enteromorpha prolifera</i>	27.50	31.88	13.60	27.43
	刚毛藻 <i>Cladophora glomerata</i>	263.18	20.50	9.80	13.13
	平均值 Mean	145.45	26.25	11.80	20.29
海草 Seagrass	喜盐草 <i>Halophila ovalis</i>	6.82	21.13	28.20	11.70
	二药藻 <i>Halodule uninervis</i>	5.23	5.25	11.60	8.94
	平均值	6.00	13.25	20.00	10.31
双壳类 Mollusca	日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	2.00	1.00	24.60	1.31
	真曲巴非蛤 <i>Paphia euglypta</i>	1.09	1.25	7.40	1.56
	栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	0.23	0.50	23.80	2.30
	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	0.64	0.63	8.60	1.96
	棕蚶 <i>Barbatia amygdaluntostum</i>	0.45	1.13	64.80	2.51
	斑纹巴非蛤 <i>Paphia lirata</i>	0.59	0.25	56.20	1.37
	粒帽蚶 <i>Cucullaea labiosa granulosa</i>	0.32	1.50	20.80	2.16
	大竹蛏 <i>Solen grandis</i>	1.36	0.50	3.20	2.17
	总角截蛏 <i>Solecurtus divaricata</i>	0.41	0.38	3.80	2.64
	仙女蛤 <i>Callista</i> sp.	1.45	1.13	2.60	1.84
	岐脊加夫蛤 <i>Gafraium divaricatum</i>	0.73	0.50	3.40	1.09
	平均值 Mean	0.86	0.75	20.00	1.90
腹足类 Gastropods	爪哇窦螺 <i>Sinum javanicum</i>	2.45	1.63	1.00	2.59
	珠带拟蟹手螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	1.64	1.25	3.20	2.99
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>	3.14	2.63	5.00	3.59
	平均值 Mean	2.41	1.88	3.00	3.06

至液泡贮存^[9]。可见,藻类快相的离子交换过程迅速且不耗能,而海草的金属转运是需要酶参与的耗能过程,后者要比前者低效且缓慢。

双壳类的富集系数大小顺序是 $Cd > Zn > Cu > Pb$;腹足类的富集系数大小顺序是 $Zn > Cd > Cu > Pb$,双壳类的富集系数大小顺序和腹足类的基本一致。部分双壳类(如:栉江珧、菲律宾蛤仔、纹斑巴非蛤、总角截蛭和岐脊加夫蛤)对铜和铅都不存在富集作用(富集系数小于 1),而日本镜蛤、真曲巴非蛤、仙女蛤对铜和铅的富集系数都大于 1,其他双壳类对铜或铅存在富集作用,显示不同种类间存在差异。双壳类对镉和锌均存在富集作用,其中以棕蚶和纹斑巴非蛤对镉的富集最为显著。腹足类对这四种重金属均有富集,除了镉,腹足类体内的铜、铅和锌的富集系数是双壳类的两倍多,说明腹足类的富集能力要高于双壳类,但是这 3 种腹足类都不是食用种类,因此对人类食品安全威胁不大。直接以海草和绿藻组织为食物的生物不多^[10],但是,海草和绿藻组织是碎屑的重要组成,海草和绿藻中的重金属会沿着碎屑食物链富集^[11]。在本研究中,底栖动物体内重金属含量远小于海草和绿藻。可能原因是所选双壳类都是滤食性的,主要以底栖微藻为食,腹足类也没有直接以海草和绿藻为食。海草的地上部分和绿藻藻体的更新速率较快,脱落的组织会被水流带走,海草和绿藻中的重金属很有可能输出到系统外^[12]。已有的研究表明,重金属主要在海草床的初级消费者中富集,随着营养等级的递增,动物重金属含量反而降低,这和动物体内的重金属排出机制有关^[11]。本研究没有采集鱼类和游泳甲壳类的生物体进行分析,一方面是由于采样方法的限制,另一方面,这些游泳动物的栖息地经常变化,不能反映海草床环境中重金属的污染状况。

由于近岸水体富营养化加重,海草床退化的表现之一就是海草逐渐被大型底栖藻类和附生藻类替代^[13],这种群落结构的演替会对重金属在底栖贝类和腹足类体内的富集产生怎样的影响值得进一步研究。本研究评估了流沙湾海草床大型底栖生物对铜、铅、锌和镉的富集效应,为研究重金属在底栖食物链中的迁移和转化、以及驱归提供了基础数据和切入点。由本研究的结果可见,镉在海草床大型底栖生物体内的富集模式和其他 3 种重金属有明显的差异,其原因和机理值得进一步探讨。

底栖生物的质量评价结果见表 7。腹足类生物质量良好,没有超标样品。双壳类生物体内 Pb 和 Cd 出现超标,超标率和最大超标倍数分别是:Pb(100%,11 倍);Cd(63.6%,15.2 倍)。可见,双壳类生物体内 Pb 和 Cd 超标比较严重。湛江海域双壳类 Cd 超标已有报道^[14],说明附近很可能存在镉排放源。双壳类和腹足类的重金属含量没有显著差别,就平均值而言,腹足类的铜、铅和锌含量高于双壳类,但是由于腹足类的评价标准是双壳类的 10 倍到 100 倍,所以腹足类的质量状况明显好于双壳类。

表 7 海草床底栖生物的质量分数

Table 7 Quality indices of the benthic biota from the seagrass bed

类群 Group	名称 Name	Cu	Pb	Cd	Zn
双壳类	日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	0.44	8.00	6.15	0.46
Mollusca	真曲巴非蛤 <i>Paphia euglypta</i>	0.24	10.00	1.85	0.55
	栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	0.05	4.00	5.95	0.81
	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	0.14	5.00	2.15	0.69
	棕蚶 <i>Barbatia amygdalumtostum</i>	0.10	9.00	16.2	0.88
	斑纹巴非蛤 <i>Paphia lirata</i>	0.13	2.00	14.05	0.48
	粒帽蚶 <i>Cucullaea labiosa granulosa</i>	0.07	12.0	5.20	0.76
	大竹蛭 <i>Solen grandis</i>	0.30	4.00	0.80	0.76
	总角截蛭 <i>Solecurtus divaricata</i>	0.09	3.00	0.95	0.93
	仙女蛤 <i>Callista</i> sp.	0.32	9.00	0.65	0.65
	岐脊加夫蛤 <i>Gafrarium divaricatum</i>	0.16	4.00	0.85	0.38
	最小值	0.05	2.00	0.65	0.38
	最大值	0.44	12.0	16.2	0.93

续表

类群 Group	名称 Name	Cu	Pb	Cd	Zn
	平均值	0.19	6.36	4.98	0.67
腹足类	爪哇窦螺 <i>Sinum javanicum</i>	0.05	0.13	0.01	0.07
Gastropods	珠带拟蟹手螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	0.04	0.10	0.03	0.08
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>	0.07	0.21	0.05	0.10
	最小值	0.04	0.10	0.01	0.07
	最大值	0.07	0.21	0.05	0.10
	平均值	0.05	0.15	0.03	0.09

3 结论

1) 流沙湾海草床水体和表层沉积物中的铜、铅、镉和锌含量很低, 沉积物重金属的潜在生态危害轻微。

2) 大型底栖绿藻和海草对重金属有明显的富集作用, 尤其是绿藻。两者富集系数的大小顺序大致相反, 显示出它们对重金属富集效应的显著差异。

3) 底栖双壳类软体动物对铜和铅的平均富集系数均小于 1, 对镉和锌的平均富集系数均大于 1, 尤其是对镉的富集系数达到 20。双壳类体内 Pb 和 Cd 超标比较严重, 指示附近可能有镉的污染源。底栖腹足类对四种重金属都有富集, 对镉的富集也是较高的。因此, 镉元素在流沙湾海草床大型底栖生物体内的富集效应显著, 应重点关注。

References:

- [1] Hemminga M A, Duarte C M. Seagrass Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 200-206.
- [2] Huang X P, Huang L M, Li Y H, Xu Z Z, Fong C W, Huang D J, Han Q Y, Huang H, Tan Y H, Liu S. Main seagrass beds and threats to their habitats in the coastal sea of South China. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S2): 136-142.
- [3] Liu F W, Yan W, Wang W Z, Gu S C, Chen Z. Pollution of heavy metals in the Pearl River estuary and its assessment of potential ecological risk. Marine Environmental Science, 2002, 21(3): 34-38.
- [4] Li G H, Lan D Z, Cao Z M, Xu J, Wang S S, Lan B B. Specificity and potential ecological risks of heavy metals in the sediments of the Xiamen Sea area. Journal of Marine Science Bulletin, 2007, 26(1): 67-72.
- [5] Liu J P, Lan D Z. Accumulation and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments from two random dumping areas in Xiamen seas. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009, 4(2): 68-73.
- [6] Campanella L, Conti M E, Cubadda F, Sucapane C. Trace metals in seagrass, algae and mulluscs from an uncontaminated area in the Mediterranean. Environmental Pollution, 2001, 111(1): 117-126.
- [7] Schlacher-Hoenlinger M A, Schlacher T A. Accumulation, contamination, and seasonal variability of trace metals in the coastal zone-patterns in a seagrass meadow from the Mediterranean. Marine Biology, 1998, 131(3): 401-410.
- [8] Zhou W B, Qiu B S. Mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance in algae. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(3): 265-272.
- [9] Sun R L, Zhou Q X. Heavy metal tolerance and hyperaccumulation of higher plants and their molecular mechanisms: a review. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(3): 497-504.
- [10] Greenway M. Tropical relationships of macrofauna within a Jamaican seagrass meadow and the role of the echinoid *Lytechinus variegatus* (Lamarck). Bulletin of Marine Science, 1995, 56(3): 719-736.
- [11] Barwick M, Maher W. Biotransference and biomagnification of selenium copper, cadmium, zinc, arsenic and lead in a temperate seagrass ecosystem from lake Macquarie Estuary, NSW, Australia. Marine Environmental Research, 2003, 56(4): 471-502.
- [12] Coelho J P, Pereira M E, Duarte A C, Pardal M A. Contribution of primary producers to mercury trophic transfer in estuarine ecosystems: possible effects of eutrophication. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(3): 358-365.
- [13] Ferdie M, Fourqurean J W. Responses of seagrass communities to fertilization along a gradient of relative availability of nitrogen and phosphorus in a carbonate environment. Limnology and Oceanography, 2004, 49(6): 2082-2094.
- [14] Huang C J, Zhao Z. Assessment on content of heavy metals in seafood from Zhanjiang Harbor. Journal of Shantou University (Natural Science Edition), 2007, 22(1): 30-36.

参考文献:

- [3] 刘芳文, 颜文, 王文质, 古森昌, 陈忠. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价. 海洋环境科学, 2002, 21(3): 34-38.
- [4] 李桂海, 蓝东兆, 曹志敏, 许江, 王珊珊, 蓝彬斌. 厦门海域沉积物中的重金属及其潜在生态风险. 海洋通报, 2007, 26(1): 67-72.
- [5] 刘洁平, 蓝东兆. 厦门海域废弃物倾倒地表层沉积物重金属富集特征及其生态危害评价. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(2): 68-73.
- [8] 周文彬, 邱保胜. 藻类对重金属的耐性与解毒机理. 湖泊科学, 2004, 16(3): 265-272.
- [9] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 497-504.
- [14] 黄长江, 赵珍. 湛江港海域海产品中重金属残留及评价. 汕头大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 30-36.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 23 December, 2011 (Semimonthly)
CONTENTS

Satellite-based modelling light use efficiency of alpine meadow along an altitudinal gradient	FU Gang, ZHOU Yuting, SHEN Zhenxi, et al (6989)
Changes in the concentrations of airborne <i>Picea schrenkiana</i> pollen in response to temperature changes in the Tianshan Mountain area	PAN Yanfang, YAN Shun, MU Guijin, et al (6999)
Primary production in the Bay of Bengal during spring intermonsoon period	LIU Huaxue, KE Zhixin, SONG Xingyu, et al (7007)
Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China	WU Xinwei, LI Guoyong, SUN Shucun (7013)
SOFM-based nutrient cycling classification of forest ecosystems in the Loess Plateau	CHEN Kai, LIU Zengwen, LI Jun, et al (7022)
Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	WANG Yan, CHEN Jianwen, et al (7031)
Effect of silicon supply on Tall Fescue (<i>Festuca arundinacea</i>) growth under the salinization conditions	LIU Huixia, GUO Xinghua, GUO Zhenggang (7039)
Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of <i>Simmondsia Chinensis</i> seedlings from different provenances	HUANG Weiwei, ZHANG Niannian, HU Tingxing, et al (7047)
Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau	ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia (7056)
The distribution of male and female <i>Populus cathayana</i> populations along an altitudinal gradient	WANG Zhifeng, XU Xiao, LI Xiaofeng, et al (7067)
Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring	DU Feiyan, LIN Qin, JIA Xiaoping, et al (7075)
The effects of season and environmental factors on community structure of planktonic copepods in Zhanjiang Bay, China	ZHANG Caixue, GONG Yuyan, WANG Xuefeng, et al (7086)
Population genetic structure of <i>Pneumatophorus japonicus</i> in the Taiwan Strait	ZHANG Liyan, SU Yongquan, WANG Hangjun, et al (7097)
Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors	YU Chao, CHU Jinyu, BAI Xiaohua, et al (7104)
Population dynamics and production of <i>Bellamyia aeruginosa</i> (Reeve) (Mollusca: Viviparidae) in artificial lake for transgenic fish, Wuhan	XIONG Jing, XIE Zhicai, JIANG Xiaoming, et al (7112)
Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland	WANG Weiqi, XU Linglin, ZENG Congsheng, et al (7119)
Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil	WANG Hongxin, HU Feng, XU Xinwang, et al (7125)
Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland	LU Yanyan, SONG Fupeng (7133)
Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field	MA Li, LI Chaohai, FU Jing, et al (7141)
Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period	JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al (7151)
The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress	LIU Jianfang, ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, et al (7161)
Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain	LUO Yan, QIAO Yuhui, WU Wenliang (7170)
Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco	XU Zicheng, SHAO Huifang, SUN Shuguang, et al (7179)
Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	SONG Wei, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al (7188)
Rapid cold hardening of Western flower thrips, <i>Frankliniella occidentalis</i> , and its ecological cost	LI Hongbo, SHI Liang, WANG Jianjun, et al (7196)

- Effects of temperature on body color in *Sitobion avenae* (F.) DENG Mingming, GAO Huanhuan, LI Dan, et al (7203)
- Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions
..... GAO Jianchang, GUO Guangjun, GUO Yanmei, et al (7211)
- Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland
..... CHEN He, YANG Ying, YU Shiwei, et al (7218)
- Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perspective of organic production model in China
..... HU Qiuhong, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (7227)
- Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic
Microcystis aeruginosa HE Zongxiang, ZHANG Tingting (7235)
- Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay XU Zhanzhou, ZHU Aijia, CAI Weixu, et al (7244)
- A gradient analysis of urban architecture landscape pattern based on QuickBird imagery
..... ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (7251)
- Landscape spatial heterogeneity is associated with urbanization: an example from Yangtze River in Jiangsu Province
..... CHE Qianjin, CAO Youhui, YU Lu, et al (7261)
- CVM for Taihu Lake based on ecological functions of wetlands restoration, and ability to pay and willingness to pay studies
..... YU Wenjin, XIE Jian, ZOU Xinqing (7271)
- Review and Monograph**
- Progress in research on the marine microbial loop in the Arctic Ocean HE Jianfeng, CUI Shikai, ZHANG Fang, et al (7279)
- Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces
..... SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, et al (7287)
- Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust
..... FANG Fengman, LIN Yuesheng, WANG Haidong, et al (7301)
- Scientific Note**
- Spatial structures of soilcarbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorger Reservoir Areas
..... LIN Yinghua, WANG Laifa, TIAN Xiaokun, et al (7311)
- The relationship between *Oligochroa cantonella* Caradja and environmental factors LIU Wenai, FAN Hangqing (7320)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 23 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 23 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元